
Geinitz, Veronika; Heß, Dieter :

***Einfluss der Gleichmäßigkeit und der Oberflächeneigenschaften
von Federstahldrähten auf die Parameter von Schraubenfedern***

*Publikation entstand im Rahmen der Veranstaltung
(wurden aber versehentlich nicht im gleichnamigen Tagungsband
abgedruckt):*

Federn - unverzichtbare Bauteile der Technik : Tagung Fulda, 7. und
8. November 2006 / VDI-Gesellschaft Entwicklung, Konstruktion,
Vertrieb.

Einfluss der Gleichmäßigkeit und der Oberflächeneigenschaften von Federstahldrähten auf die Parameter von Schraubenfedern

Dr.-Ing. V. **Geinitz**, TU Ilmenau, Ilmenau;
Dipl.-Ing. D. **Hess**, TU Ilmenau, Ilmenau

Kurzfassung

Viele kaltgeformte Federn werden aus patentiert gezogenen Federstahldrähten hergestellt, deren Kennwerte in der Norm DIN EN 10270 –1 [1] zusammengefasst sind. Diese genormten Drahtparameter werden von Mitarbeitern der Federnindustrie bezüglich Gleichmäßigkeit des Drahtes und Drahtoberfläche als nicht ausreichend beschrieben. Deshalb ist es notwendig, Prüfverfahren zu entwickeln, die umfassendere Aussagen zur Beurteilung der Qualität des Federdrahtes, insbesondere seiner Gleichmäßigkeit in Bezug auf Geometrie- und Oberflächenparameter und Umformeigenschaften, liefern. Der Beitrag zeigt anhand von Beispieldrähten die Ergebnisse der Gleichmäßigkeitsuntersuchungen und die Auswirkungen von neuartigen Beschichtungssystemen sowie den Zusammenhang zu Parametern von Schraubenfedern, die aus diesen Drähten hergestellt wurden.

1. Problemstellung

Die immer weiter steigenden Anforderungen an Federn bezüglich Einhaltung ihrer Funktion und Gestalt, besserem Langzeitverhalten sowie erhöhter Belastbarkeit und Lebensdauer können die Federhersteller nur erfüllen, wenn die Drahtindustrie in Verbindung mit der Schmiermittelindustrie Federstahldraht bereitstellen kann, der diesen wachsenden Anforderungen gerecht wird. Eine maßgebliche Rolle spielen in dem Zusammenhang neben den mechanischen Eigenschaften die Formmaße des Drahtes sowie sein Gleitverhalten beim Verarbeiten zu Federn und anderen Drahtprodukten.

Zu den Formmaßen des patentiert gezogenen Federstahldrahtes gehören auch der axiale Versatz f und der Durchmesser eines freien Drahtumgangs D_{Fu} , die in der Norm unter der Überschrift „Lieferbedingungen“ aufgeführt sind. Beide Drahtformmaße können innerhalb eines Drahtcoils stark schwanken. Diese Schwankungen wirken sich auf die Formgenauigkeit der aus diesem Draht hergestellten Schraubenfeder aus, auch dann noch, wenn der Draht gerade gerichtet wurde. Gegenwärtig genutzte Federwindemaschinen können auf diese Schwankungen nicht reagieren. Deshalb muss die Drahtziehtechnologie so gestaltet wer-

den, dass ein in diesen Formparametern über die Drahtlänge gleichmäßiger Draht hergestellt wird.

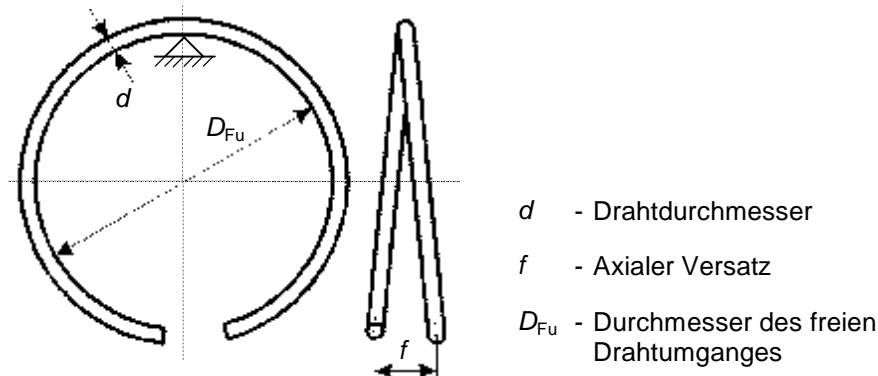


Bild 1: Geometrische Drahtkenngrößen von patentiert gezogenen Federstahldrähten

Das Gleitverhalten des Drahtes wird durch seine Oberflächeneigenschaften, vor allem seine Beschichtung, und durch die Oberflächeneigenschaften der Werkzeuge der Drahtverarbeitungsmaschinen bestimmt.

Die Beschichtung des Drahtes erfolgt im Drahtziehprozess. Sie ist erforderlich, um den hohen tribologischen Belastungen beim Drahtziehen gerecht zu werden und die angestrebte hohe Drahtqualität zu erreichen. Die Wahl geeigneter Drahtbeschichtungssysteme ist deshalb eine vorrangige Aufgabe, wenn man die Gleichmäßigkeit des Federstahldrahtes hinsichtlich seiner Oberflächenbeschaffenheit, mechanischen Kennwerte und Formmaße und damit seine Lauf- und Umformeigenschaften positiv beeinflussen will. Sie sind für die Qualität, Produktivität und Prozessstabilität der Federfertigung maßgebend.

2. Gleichmäßigkeitsuntersuchungen an vorgekrümmten Drähten

Die Geometrieparameter des vorgekrümmten patentiert gezogenen Federstahldrahtes axialer Versatz f und Durchmesser D_{Fu} eines freien Drahtumganges (auch als Schlag des Drahtes bezeichnet) werden bei der Drahtherstellung teils definiert verändert, z.B. durch das Richten, teils unbeabsichtigt beeinflusst. Bekannte Ursachen dafür sind z.B.:

- die Stellung des Ziehsteins,
- das Aufwickeln des Drahtes auf der Ziehscheibe,
- zu kleine Umlenkradien bei der Zuführung des Drahtes zur Windemaschine oder auch in der Ziehmaschine,
- ein „Ziehen über die Kante“ beim Einlauf des Drahtes vom Haspel in die Ziehmaschine, zwischen den Ziehstufen oder auch beim Verlegen des Drahtes auf eine Spule,

- Ziehmaschinen, bei denen sich der Ablaufhaspel nicht mitdreht,
- Ziehmaschinen mit Über-Kopf-Ziehstufen,
- Ziehmaschinen mit Ziehwickler,
- Ziehmaschinen mit Umlenkungen des Drahtes nicht entsprechend ihrer Vorkrümmung.

Erschwerend für die Prozessstabilität der Federfertigung kommt hinzu, dass die Drahtparameter D_{Fu} und f entsprechend DIN EN 10270 nur je ein Mal am Coilanfang und -ende bestimmt werden und somit keine Aussagen über die Konstanz dieser Drahtformmaße über die Drahtlänge des gesamten Coils möglich sind. Untersuchungen haben aber gezeigt, dass insbesondere der axiale Versatz f und der Durchmesser des freien Drahtumgangs D_{Fu} innerhalb eines Drahtcoils stark schwanken können und sich diese Schwankungen auf die Formgenauigkeit der gefertigten Federn auswirken. Dabei ist zu berücksichtigen, dass aus dem Draht eines freien Drahtumgangs im Regelfall mehrere Federn hergestellt werden. Schwankungen im Umformverhalten treten aber auch innerhalb einer Feder auf, also auf einem kurzen Drahtabschnitt. Daher ist die Prüfung der Drahtparameter D_{Fu} und f nach DIN EN 10270 [1] zur Beurteilung der Gleichmäßigkeit und damit zur Einhaltung heutiger Qualitätsstandards nicht ausreichend.

Um die Auswirkungen der Schwankungen der Drahtformmaße auf die Schraubenfederparameter sichtbar zu machen, wurde die Prüfmethode „Lange Feder“ entwickelt. Dabei wird eine Feder mit geringem Umformgrad, also großem Wickelverhältnis ($w \approx 30$) und kleiner Steigung hergestellt. Die „Lange Feder“ sollte mindestens 300 Windungen haben. Bei einem Drahtdurchmesser $d = 1,0$ mm werden für eine „Lange Feder“ damit beispielsweise ca. 30 m Draht verarbeitet. Die Gleichmäßigkeit dieser "Langen Feder" hinsichtlich Windungsabstand m und Federaußendurchmesser D_e ist ein Beurteilungskriterium für das Umformverhalten und die Gleichmäßigkeit des Federdrahtes (Bild 2).

Die „Lange Feder“ wird visuell beurteilt und erlaubt den Vergleich verschiedener Drahtsorten und –chargen bezüglich ihres Umformverhaltens (Tabelle 1). Ungleichmäßiger Draht kann im Ergebnis der Bewertung aussortiert und für Federn mit geringeren Genauigkeitsanforderungen verwendet werden, da eine effektive Einflussnahme im Windeprozess derzeit nicht möglich ist.



Bild 2: „Lange Federn“ aus sehr gleichmäßigem Draht (oben), überwiegend gleichmäßigem Draht (Mitte) und ungleichmäßigem Draht (unten), Drahtdurchmesser $d = 0,4 \text{ mm}$ [4]

Tabelle 1: Bewertungskriterien zur Auswertung der qualitativen Prüfmethode „Lange Feder“

Bewertung	Bewertungskriterium
1	ganz besonders gleichmäßig
2	im wesentlichen gleichmäßig, es sind leichte Ungleichmäßigkeiten erkennbar
3	es sind deutliche Ungleichmäßigkeiten erkennbar
4	ganz besonders ungleichmäßig, eine Verarbeitung zu Federn mit großem Wickelverhältnis ist nicht sinnvoll

Mit der Prüfmethode „Lange Feder“ kann somit die Einschätzung der Verarbeitbarkeit des Federdrahtes objektiviert werden. Ein großer Vorteil dieser Untersuchungsmethode besteht darin, dass keine zusätzlichen Versuchsaufbauten verwendet werden müssen und die Drahtprüfung unter sehr praxisnahen Bedingungen an der zur Federherstellung genutzten Federwindemaschine geschieht. Voraussetzung dafür ist allerdings, dass an der Windemaschine alle Maßnahmen für konstante Umformbedingungen eingehalten werden müssen [2]. Ein Nachteil der beschriebenen Prüfmethode ist, dass der Draht nicht zerstörungsfrei geprüft wird.

Um diesen Nachteil zu beheben, wurde zur kontinuierlichen zerstörungsfreien online-Drahtprüfung hinsichtlich Gleichmäßigkeit der Geometrieparameter axialer Versatz f und freier Drahtumgang D_{Fu} eine Versuchseinrichtung mit Sensorrad entwickelt und aufgebaut (Bild 3, Geometriemessung). Das Sensorrad lenkt aus, wenn der Draht axialen Versatz auf-

weist und erzeugt über einen Wegsensor ein Sensorsignal. Änderungen im axialen Versatz und im freien Drahtumgang führen zu Änderungen im Ausschlag des Sensorrades und damit im gemessenen Sensorsignal.

Zur Bewertung der Gleichmäßigkeit der zu verarbeitenden Drähte sollten mit dieser Einrichtung pro Draht 3000 - 5000 m geprüft und das Sensorsignal in Schritten von ca. 5 mm Drahtlänge aufgezeichnet werden. Mittels der Messsoftware DASYLAB [5] werden dabei die Sensorausschläge (Amplituden) in Abhängigkeit von der Drahtlänge als Datenfile abgelegt und anschließend ausgewertet.

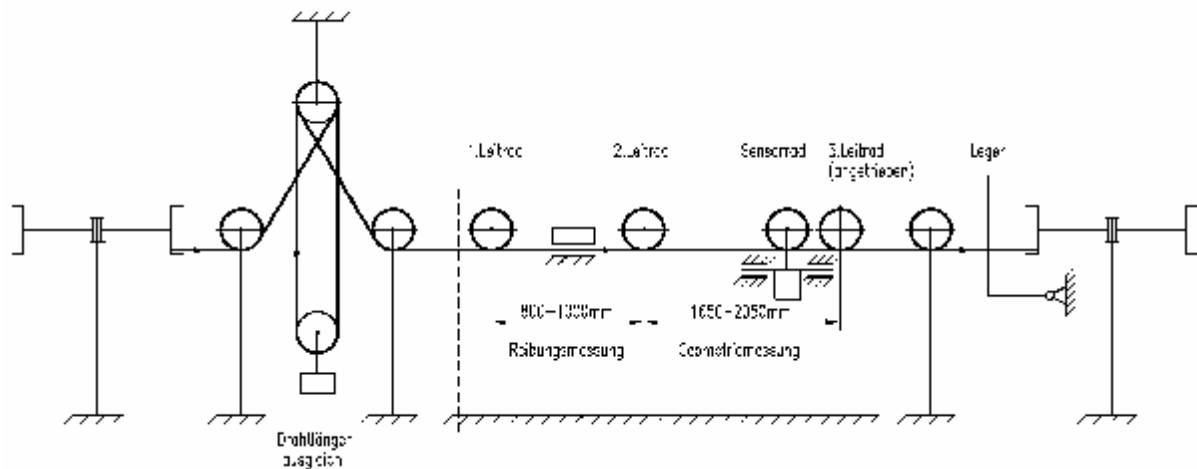


Bild 3: Drahtdurchlaufprüfeinrichtung für Drähte mit $1,0 \text{ mm} \leq d \leq 2,0 \text{ mm}$ [3]



Bild 4: Laboraufbau der Drahtdurchlaufprüfeinrichtung [3]

Die Bilder 5 und 6 zeigen die Signalverläufe des Sensorrades zur Geometriemessung an Drähten mit großen bzw. sehr geringen Formmaßschwankungen und deren Auswirkungen

auf die Gleichmäßigkeit der Schraubenfederparameter, die aus diesen Drähten hergestellt wurden.

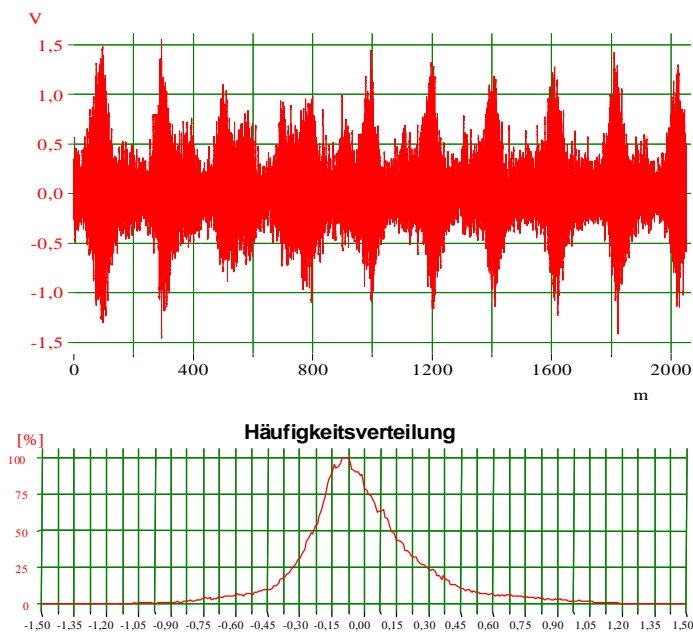


Bild 5: Sensorsignalamplitude über der Drahtlänge und deren Häufigkeitsverteilung eines Drahtes mit großen Drahtformmaßschwankungen und daraus hergestellte Federn mit Wickelverhältnis $w = 20$ [3]

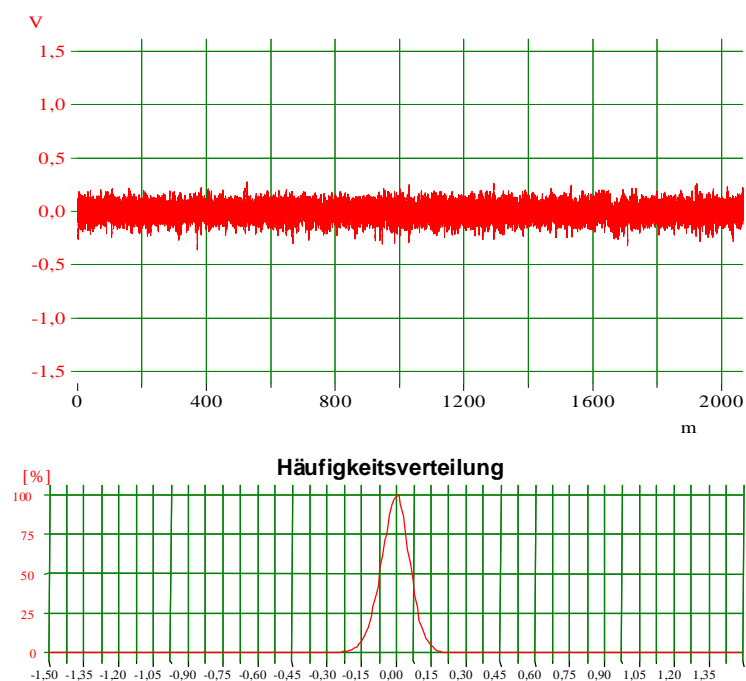


Bild 6: Sensorsignalamplitude über der Drahtlänge und deren Häufigkeitsverteilung eines hochwertigen Drahtes und daraus hergestellte Federn, Wickelverhältnis $w = 20$ [3]

Tabelle 2 enthält die Ergebnisse der Formmaßprüfung mittels Sensorrad (Drahtdurchlaufprüfeinrichtung) und der Prüfmethode „Lange Feder“ von den drei Drähten, deren „Lange Federn“ in Bild 2 zu sehen waren. Die Auswertung der Prüfergebnisse mit dem Sensorrad bestätigt, dass ein Draht hinsichtlich seiner Drahtformparameter D_{Fu} und f sehr gleichmäßig ist und ein Draht sehr ungleichmäßig. Ein weiterer Draht ist im Wesentlichen gleichmäßig. Diese Ergebnisse schlagen sich auch im Umformverhalten der Drähte beim Winden zu „Langen Federn“ nieder (Bild 2) und weisen nach, dass zwischen beiden beschriebenen Methoden zur Prüfung der Gleichmäßigkeit von Federstahldraht eine sehr gute Korrelation besteht.

Tabelle 2: Gleichmäßigkeitsuntersuchung mittels Sensorrad an Drähten mit $d = 0,4$ mm und mit der Prüfmethode „lange Feder“ [4]

Beispieldraht aus Bild 2	Prüfmethode „Lange Feder“	Merkmale	Spannweite des Sensorradausschlages	
			Wahrscheinlichkeit [%]	Spannweite [V]
Qualitativ schlechter Draht	Bewertung: 3-4	<ul style="list-style-type: none"> • große Amplitude des Sensorsignales über der Drahtlänge; • sehr flache und breite Häufigkeitsverteilung 	90 95 99	2,76 3,28 3,83
Qualitativ mittelmäßiger Draht	Bewertung: 2-3	<ul style="list-style-type: none"> • mittlere Amplitude des Sensorsignales über der Drahtlänge; • weniger breite Häufigkeitsverteilung 	90 95 99	0,66 0,79 1,14
Qualitativ guter Draht	Bewertung: 1-2	<ul style="list-style-type: none"> • kleine Amplitude des Sensorsignales über der Drahtlänge; • sehr schmale Häufigkeitsverteilung 	90 95 99	0,33 0,40 0,55

Eine industrietaugliche Versuchseinrichtung mit Sensorrad sollte deshalb insbesondere in Firmen zur Herstellung von Drähten Anwendung finden. Sie könnte sowohl zur Einrichtung der Drahtziehmaschine als auch zur Online-Qualitätsüberwachung eingesetzt werden.

Eindeutige Aussagen über die Ursachen, die zu den festgestellten Drahtformmaßschwankungen geführt haben, können aus den Sensorsignalverläufen nicht getroffen werden, da bei den untersuchten Drähten der Bezug zur jeweiligen Drahtziehanlage fehlt. Mögliche Ursachen sind jedoch ungleichmäßiger Ausgangsdraht, Tastrollenbewegungen, fehlerbehaftete Umlenkungen sowie Richt- und Spulprozesse.

Zur Aufklärung der Ursachen für periodische Schwankungen im Umformverhalten des Drahtes bei Bekanntsein der verwendeten Drahtziehanlage kann die Fourier-Analyse des Sensorsignals genutzt werden. In Bild 7 ist die Sensorsignalamplitude über der Drahtlänge eines patentiert gezogenen Drahtes mit $d = 1,8$ mm dargestellt, der auf einer 10-zügigen tastrollengesteuerten Geradeausziehmaschine mit einem Ziehwickler als letzter Ziehstufe hergestellt wurde. Die Scheibe des Ziehwicklers hat einen Durchmesser von 600 mm und damit einen Umfang von 1,9 m. Die Sensorsignalamplitude weist periodische Schwankungen auf.

Über die Fourier-Transformation (Bild 8) wurde eine Periodizität von rund 1,9 m ermittelt. Das lässt den Schluss zu, dass die durch den Ziehwickler pro Scheibenumfang hervorgerufene Verdrehung des Drahtes um 360° dessen Umformverhalten stark beeinflusst. Beim Herstellen von „Langen Federn“ aus ungerichtetem Draht ist dieser sich wiederholende Spannungszustand als variierender Windungsabstand deutlich zu erkennen (Bild 9).

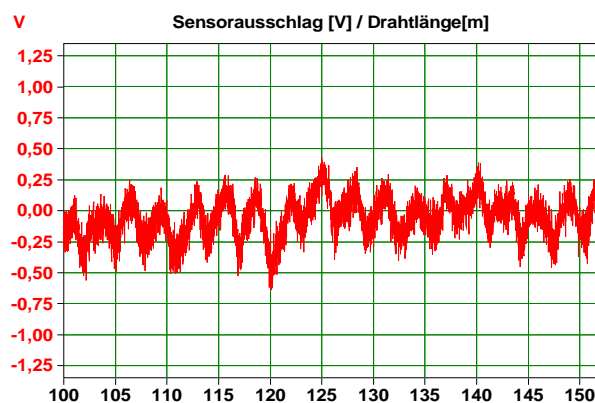


Bild 7: Sensorsignalamplitude über der Drahtlänge von einem patentiert gezogenen Draht mit $d = 2,0$ mm

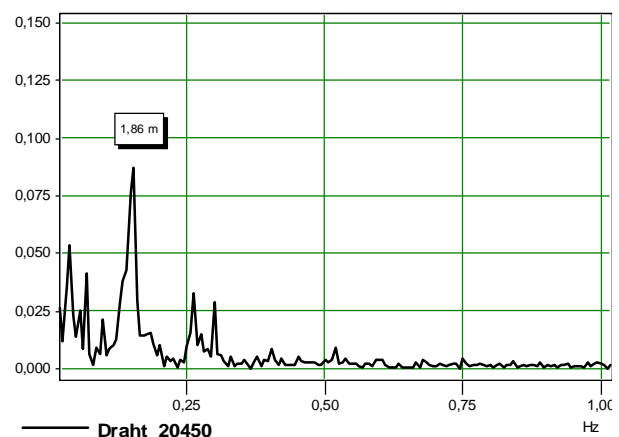


Bild 8: Zugehörige Fourier-Transformation



Bild 9: Periodische Steigungsschwankungen durch Ziehwickler

Durch die Wechselbiegungen beim Drahtrichten werden die im Draht vorhandenen Eigenspannungen zwar vergleichmäßigt, Versuche zeigen aber, dass auch ein optisch gerade gerichteter Draht noch ein über die Länge ungleichmäßiges Umformverhalten zeigt.

Stichprobenartige Versuche dazu wurden an dem genannten „Ziehwicklerdraht“ durchgeführt. Der Draht wurde durch einen 7-Rollen-Richtapparat in zwei Ebenen gerade gerichtet. Die Einstellung der Richtrollen erfolgte entsprechend der vom Hersteller für diesen Draht empfohlenen Werte. Die aus diesem gerichteten Draht hergestellten Federstränge mit einem Wickelverhältnis $w = 10$ zeigen zwar geringere Schwankungen, das sich wiederholende Muster von engen und weiten Windungsabständen ist aber weiter feststellbar mit einer Periode von ca. 33 Windungen, woraus sich eine Drahtlänge von $L_{\text{Draht}} = \pi \cdot D \cdot n = \pi \cdot 18 \text{ mm} \cdot 33 = 1,86 \text{ m}$ errechnet. Für Versuchsfedern mit dem Wickelverhältnis $w = 20$ ist quasi keine vergleichmäßigende Wirkung des Drahtrichtens zu erkennen (Bild 10).

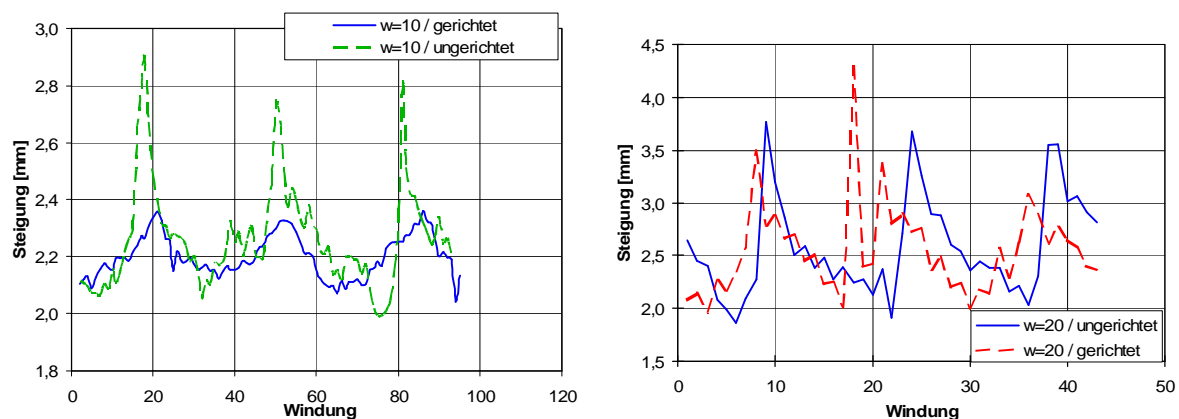


Bild 10: Steigung pro Windung bei einer „Langen Feder“ mit dem Wickelverhältnis $w = 10$ bzw. $w = 20$, die aus ungleichmäßigem Draht hergestellt wurden
Parameter: Richten

4. Einfluss von Beschichtungen auf das Lauf- und Umformverhalten von Federstahldrähten

Die in der Norm genannten Oberflächenparameter beschränken sich auf solche, die bei der Drahtherstellung einzuhalten sind. Offen bleibt die Frage, wie sich die Oberflächenparameter des Drahtes auf die Parameter der gewundenen Feder auswirken. Deshalb wurden Untersuchungen durchgeführt, die den Zusammenhang zwischen dem durch die Oberflächenparameter charakterisierten Laufverhalten des Drahtes und dem Umformergebnis, also den Parametern der gewundenen Schraubenfeder, beschreiben.

Ausgehend von den Ergebnissen aus drei Ziehversuchen zur Auswahl zweckmäßiger Ziehsteingeometrien, geeigneter Drahtziehmaschinen sowie Drahtbeschichtungssysteme (Phosphatierung, Ziehmittelträger, Ziehseife) wurden in einem vierten Ziehversuch Federstahldrähte für Industrierversuche zum Federwinden hergestellt. Dabei wurden das Beschichtungssystem und die Ziehgeschwindigkeit variiert.

Die gezogenen Probedrähte wurden umfangreichen Untersuchungen hinsichtlich der Gleichmäßigkeit ihrer Formmaße sowie ihres Gleitverhaltens unterzogen [4]. Hierzu kam der eigens dafür entwickelter Durchlaufprüfstand zur Reibwertmessung zwischen Draht und Windestift und zur Prüfung der Gleichmäßigkeit der Drahtformmaße zum Einsatz (Bild 1). Die Auswahl geeigneter Drahtbeschichtungssysteme wurde durch umfangreiche Tribometerversuche unterstützt. Darüber hinaus wurden an ausgewählten Probedrähten Rauheitsmessungen in Drahtlängs- und –umfangsrichtung durchgeführt und die Restziehmittelaufgabe bestimmt sowie der Verschleiß der Windestifte ermittelt.

Durch den Einsatz ausgewählter Beschichtungssysteme sowie durch Nutzung weiterer Erkenntnisse lassen sich Federstahldrähte herstellen, die das Winden von Federn ermöglichen, deren Abmessungen gegenüber Federn aus Draht der laufenden Produktion deutlich geringere relative Standardabweichungen aufweisen. Der Nachweis wurde sowohl in den Windeversuchen unter Industriebedingungen als auch unter Laborbedingungen erbracht. Dies geht aus Bild 11 hervor, in dem die relativen Standardabweichungen der Federlänge L_0 und des Federaußendurchmessers D_e einer Feder aus einem laufenden Fertigungsauftrag (Tabelle 3) in Abhängigkeit von der Länge des verarbeiteten Drahtes exemplarisch dargestellt sind. Dabei wurden die Ergebnisse der Stichproben von jeweils 100 Federn aus Draht der Standardproduktion und aus einem Probedraht gegenübergestellt, der mit einem neuen Beschichtungssystem der untersuchten Variante V2 gefertigt worden ist. Bei Verwendung dieses Drahtes können somit die Genauigkeit der Federn verbessert bzw. bei gleich bleibenden Genauigkeitsforderungen der Ausschuss gesenkt und damit die Wirtschaftlichkeit der Federfertigung erhöht werden.

Tabelle 3: Abmessungen und Kennwerte einer Feder aus laufender Produktion

$d = 2,00$ mm	$D_e = 12,50$ mm	=	$n_t = 14,00$	$n_f = 15,50$	$L_0 = 61,80$ mm	$R = 9,90$ N/mm	$w = 5,25$
------------------	------------------	---	---------------	---------------	------------------	--------------------	------------

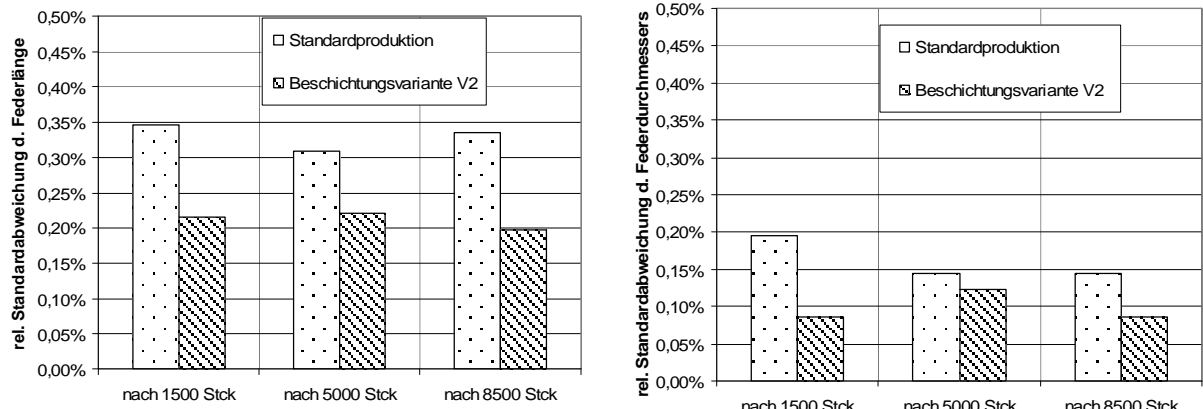


Bild 11: Relative Standardabweichung von Federlänge L_0 und Federaußendurchmesser D_e einer Feder nach Tafel 1 aus Draht der laufenden Fertigung sowie aus Probedraht, hergestellt mit der Beschichtungsvariante V2

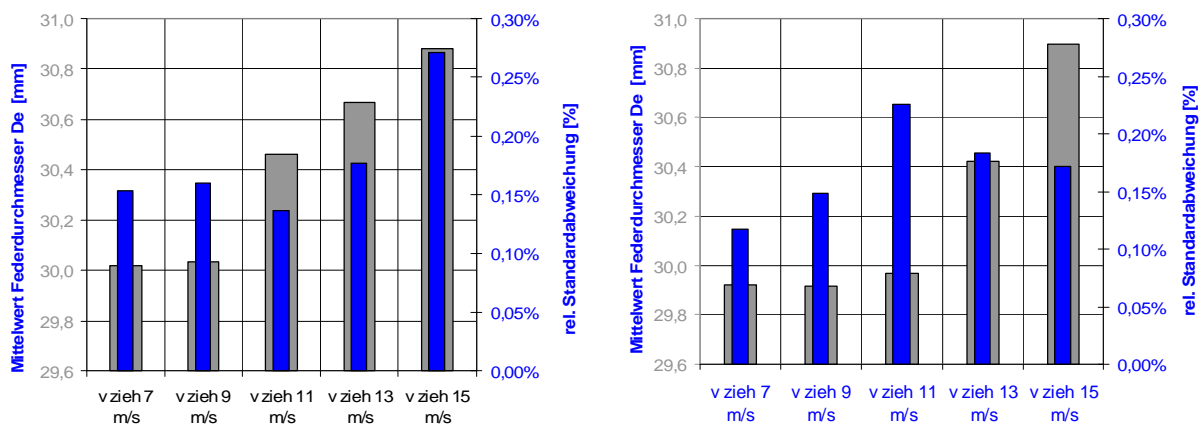


Bild 12: Abhängigkeit des Federaußendurchmessers D_e sowie der relativen Standardabweichung für zwei Drahtbeschichtungsvarianten V1 (links) und V2 (rechts) in Abhängigkeit von der Ziehgeschwindigkeit v_{zieh}

Die Drahtziehgeschwindigkeit beeinflusst die Oberflächeneigenschaften des Drahtes. Federstahldraht, der mit der Ziehgeschwindigkeit von $v_{zieh} = 7$ m/s hergestellt wurde, hat sich als Draht mit der geringsten Schwankungsbreite des Reibwertes erwiesen (Bild 13).

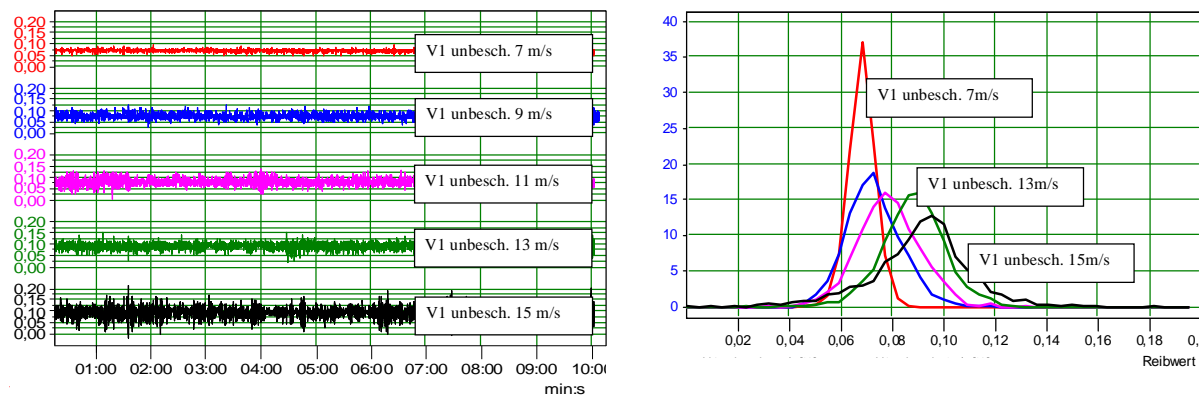


Bild 13: Reibwert und Häufigkeitsverteilung des Reibwertes in % zwischen Draht und unbeschichtetem Windestift in Abhängigkeit von der Ziehgeschwindigkeit

4. Zusammenfassung

Die Gleichmäßigkeit der Drahtformmaße axialer Versatz f und Durchmesser eines freien Drahtumgangs D_{Fu} wirkt sich auf die Formgenauigkeit der aus diesem Draht hergestellten Schraubenfeder aus. Deshalb müssen sowohl die verfahrenstechnischen Schritte als auch die Drahtziehmaschine so gewählt und eingerichtet werden, dass ein in diesen Drahtformparametern gleichmäßiger Draht hergestellt wird. Die Gleichmäßigkeit kann über die Prüfmethode „Lange Feder“ oder mittels Versuchseinrichtung mit Sensorrad überprüft werden. Speziell ausgesuchte Beschichtungen des Federstahldrahtes ermöglichen es, die Standardabweichungen von Federlänge und –durchmesser von aus diesem Draht gefertigten Schraubenfedern deutlich zu verringern.

5. Literaturangaben:

- [1] DIN Taschenbuch 349, Federn 2. Werkstoffe, Halbzeuge, 1. Auflage, Beuth Verlag GmbH Berlin Wien Zürich, 2001
- [2] Geinitz, V.: Genauigkeits- und auslastungsoptimierte Schraubendruckfedern. TU Ilmenau Diss. 2005, ISBN 3-938843-11-X
- [3] Schorcht, H.-J. ; Weiß, M. u.a.: Einfluss von Beschichtungen auf das Lauf- und Umformverhalten von Federstahldrähten auf Federwindeautomaten. Abschlussbericht zum AVIF-Forschungsvorhaben A 168/S 24/10017/01
- [4] Schorcht, H.-J.; Weiß, M.; u.a.: Technologien zur Weiterentwicklung der Qualität und Verarbeitbarkeit von Federdraht durch Kenntnis seines Umformverhaltens. Abschlußbericht zum gleichnamigen AiF-Forschungsthema 11517B, TU Ilmenau 2001
- [5] DASyLab 32 V 4.02.20 Datalog GmbH: Mönchengladbach 1998